

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,  
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 520.64

**ЭЛЕКТРОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР ЭЛСПЕК  
ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ МИССИЙ**

**© 2026 г. А. И. Петух\*, Д. А. Моисеенко, А. А. Матюхин,  
Р. Н. Журавлев, А. Ю. Шестаков, О. Л. Вайсберг**

*Институт космических исследований*

*Российской академии наук*

*Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 84/32*

*\*e-mail: a\_petukh@cosmos.ru*

Поступила в редакцию 10.10.2025 г.

После доработки 05.12.2025 г.

Принята к публикации 12.01.2026 г.

Описывается конструкция перспективного спектрометра электронов, разрабатываемого для проекта Венера-Д и предназначенного для регистрации параметров функции распределения электронов на орбитах искусственного спутника Венеры. Спектрометр также может использоваться для регистрации параметров космической плазмы на борту других околоземных и межпланетных космических аппаратов, демонстрируются результаты лабораторных испытаний прототипа спектрометра, изготовленного с использованием аддитивных технологий. Прибор обладает энергетическим разрешением 6.5%, полем зрения 160° по азимутальному углу и 6° по полярному углу, азимутальное разрешение составляет до 10°. Полученные результаты подтверждают достижимость заявленных характеристик прибора и демонстрируют применимость аддитивных технологий для создания прототипов плазменных спектрометров.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Электронный спектрометр (ЭЛСПЕК) предназначен для регистрации параметров функции распределения электронов в пространстве скоростей в диапазоне энергий от 10 эВ до 15 кэВ в широком диапазоне полярных и азимутальных углов. Спектрометр может выполнять задачи по измерению высыпаний электронов в авроральном овале, исследованию параметров плазмы в магнитосфере Земли и мониторингу электронной составляющей солнечного ветра. Кроме того, он может быть использован для исследования параметров электронов на орбите

Луны и на ее поверхности с целью изучения взаимодействия спутника Земли с солнечным ветром, мини-магнитосфер – лунных магнитных аномалий – и взаимодействия Луны с магнитосферой Земли. Также анализатор применим для изучения взаимодействия солнечного ветра с плазменными оболочками планет солнечной системы, в частности, ЭЛСПЕК входит в состав плазменного комплекса миссии Венера-Д. В цели спектрометра входит анализ структуры и динамики наведенной магнитосферы планеты в зависимости от солнечной активности, в том числе исследование процессов пересоединения и ускорения частиц на границах магнитосферы и в магнитосферном хвосте [1].

В данном исследовании показана реализация технологии аддитивного производства для быстрого прототипирования космического плазменного анализатора ЭЛСПЕК. В космических исследованиях критически важны стоимость миссий и скорость производства приборов. Уменьшение трат на разработку исследовательских аппаратов достигается путем снижения массы полезной нагрузки или объединения нескольких устройств в одно универсальное [2]. В свою очередь, ускорение разработки приборов требует принципиально новых подходов быстрого производства и проектирования. Технологии быстрого производства могут быть реализованы, в том числе благодаря 3D-печати. В последнее время наблюдается рост интереса к аддитивному производству приборов, предназначенных для эксплуатации в космосе, включая плазменные анализаторы. Среди статей, посвященных теме аддитивного производства таких устройств, можно выделить публикацию, описывающую электростатическую оптику плазменного анализатора, напечатанного на 3D-принтере [3]. Устройство было сделано из полиэфирэфиркетона, его электроды – с добавлением в полиэфирэфиркетон углеродных нанотрубок. Полимолочная кислота также применяется в аддитивном производстве космических приборов. Она использовалась для изготовления квадрупольного масс-анализатора, проводящие элементы которого созданы с помощью легирования полимолочной кислоты наночастицами меди [4]. Также она была применена для производства рефлектрона масс-анализатора с лазерной абляцией и ионизацией [5].

Настоящая работа демонстрирует возможность использования аддитивных технологий для ускорения процессов разработки и производства электронного спектрометра. Приводятся характеристики прибора: энергетический диапазон, поле зрения, энергетическое и угловое разрешение, геометрический фактор.

## 2. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРОМЕТРА ЭЛЕКТРОНОВ

Для моделирования электростатической оптики спектрометра электронов использовалось программное обеспечение SIMION 8. Существуют две конфигурации анализатора ЭЛСПЕК – с широким и узким полями зрения. Прибор с широким полем зрения

предназначен для изучения плазменного окружения планет и тел Солнечной системы. Для изучения высыпаний электронов в авроральном овале и исследования параметров плазмы в магнитосфере Земли необходимо сканирующее устройство с узким полем зрения. Схема электростатической оптики ЭЛСПЕК в конфигурации с узким полем зрения представлена на рис. 1. Принцип работы электростатической оптики следующий: электроны, проходя через сканирующее устройство 1 и центральную диафрагму 2, попадают в электростатический анализатор 3 и далее корректирующим электродом направляются на координатно-чувствительный детектор на основе микроканальных пластин.

**Рис. 1.** Структура электростатической оптики спектрометра: 1 – сканирующее устройство,

Была проведена работа по модернизации модели ЭЛСПЕК, обладающей широким полем зрения, уточнены ее характеристики. Энергетическое разрешение такой конфигурации спектрометра составляет 6.8%, поле зрения по полярному углу – 130°, по азимутальному углу – 360° с угловым разрешением 20° и 10° соответственно. Модель прибора с узким полем зрения обладает энергетическим разрешением, составляющим 6.3%. Поле зрения составляет 2° по полярному углу и 160° по азимутальному. Угловое разрешение электронного спектрометра равно от 10° до 20°.

Также был рассчитан геометрический фактор, позволяющий преобразовывать количество электронов, зарегистрированное прибором, в дифференциальный поток энергии измеренной плазмы, этот параметр является мерой чувствительности оптики. Геометрический фактор для модели определен с использованием формулы (1) из работы [6]:

$$GF = \frac{C\Delta Y\Delta Z}{N_{in}E_0^2} \bar{E} \Delta E \cos^2 \bar{\theta} \Delta\theta \Delta\phi, \quad (1)$$

где  $C$  – число электронов, зарегистрированных детектором,  $\Delta Y\Delta Z$  – площадь источника,  $E$  – энергия падающих на детектор электронов,  $\theta$  – полярные углы падающих электронов,  $N_{in}$  – число зарегистрированных детектором частиц,  $E_0$  – энергия, соответствующая максимуму отклика детектора.

Общий геометрический фактор равен  $5.91 \cdot 10^{-4}$  эВ/см<sup>2</sup>·ср·эВ. Запуски частиц проводились с шагом 100 эВ по энергии. Геометрический фактор, проинтегрированный по энергии, составляет  $5.91 \cdot 10^{-2}$  см<sup>2</sup>·ср·эВ.

Была проведена оценка скорости счета анализатора на основе данных из наблюдений дискретных и диффузных полярных сияний. Параметры электронов полярного сияния в первом случае измерялись зондами Van Allen и DMSP-F17 [7]. Максимальный дифференциальный поток электронов в диапазоне энергий 10–1000 эВ составляет  $10^{13}$  см<sup>2</sup>·ср·эВ, минимальный равен  $10^8$  см<sup>2</sup>·ср·эВ. С учетом геометрического фактора прибора диапазон

скорости счета составляет  $5.91 \cdot 10^6 - 5.91 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ . В ходе измерений спектров дальнего ультрафиолетового диапазона дискретных и диффузных полярных сияний, полученных на спутнике STSAT-1, также были оценены потоки высыпающихся электронов [8]. Их энергии варьировались от 1 до 15 кэВ. Поскольку величина потока энергии изменяется в диапазоне  $10^6 - 10^{10} \text{ эВ/с} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{эВ}$ , ожидаемый диапазон скорости счета составляет  $5.91 \cdot 10^2 - 5.91 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ .

### 3. МАКЕТИРОВАНИЕ И ИСПЫТАНИЯ ПРОТОТИПА ПЛАЗМЕННОГО АНАЛИЗАТОРА

Создание конструкторской модели электростатической оптики и расчет необходимых допусков для дальнейшей печати элементов прибора были проведены в программе КОМПАС-3D. Для макетирования была выбрана конфигурация прибора с полем зрения  $160^\circ$  по азимутальному углу и  $2^\circ$  по полярному, 3D-модель такого спектрометра представлена на рис

. 2. Печать была выполнена с использованием 3D-принтера Eleego Saturn 4, работающего на основе фотополимерной смолы. Точность печати принтера составила 200 мкм. Размеры полученной оптики составили  $140 \times 108 \times 156 \text{ мм}^3$ . Для обеспечения электропроводности электроды оптики были окрашены графитовой токопроводящей краской. В качестве детектора использовался координатно-чувствительный детектор на основе микроканальных пластин. Собранный прототип спектрометра электронов представлен на рис. 3. Заключительным этапом были функциональные испытания: определены поля зрения, а также угловое и энергетическое разрешение анализатора. Испытания проводились с использованием автоматизированного рабочего места, подробно описанного в работе [9].

**Рис. 2.** 3D-модель спектрометра ЭЛСПЕК с узким полем зрения.

**Рис. 3.** Прототип спектрометра электронов ЭЛСПЕК: а – сканирующее устройство,

Для прототипа спектрометра поле зрения составляет  $160^\circ$  по азимутальному углу,  $\pm 3^\circ$  по полярному, нормированная скорость счета детектора в зависимости от полярного и азимутального углов показана на рис. 4. Угловое разрешение по азимутальному углу варьируется от  $10^\circ$  до  $20^\circ$  в зависимости от используемой диафрагмы, полученные результаты представлены на рис. 5. Энергетическое разрешение составило 6.5%, оно отображено на рис. 6. При проведении проверки  $\Delta E/E$  использовался источник заряженных частиц с разбросом энергий пучка  $\Delta E/E \leq 2\%$  и стабильностью потока после прогрева лучше 3%. В ходе проведенных испытаний показано, что расчетные и экспериментальные характеристики совпадают с хорошей точностью. Сравнение расчетных и экспериментально полученных характеристик прибора представлено в табл. 1.

**Рис. 4.** Нормированная скорость счета детектора в зависимости от полярного и азимутального углов.

**Рис. 5.** Угловое распределение электронов по азимутальному углу прототипа ЭЛСПЕК для диафрагмы 1 мм.

**Рис. 6.** Энергетическое разрешение спектрометра.

**Таблица 1.** Аналитические характеристики прибора ЭЛСПЕК

Параметр	Расчетные значения	Экспериментальные результаты
Энергетическое разрешение, $\Delta E/E$	6.3%	6.5%
Поле зрения по азимутальному углу	160°	160°
Поле зрения по полярному углу	2°	6°
Угловое разрешение по азимутальному углу	10°	10–20°*

\* В зависимости от используемой диафрагмы

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная работа показала применимость аддитивных технологий для быстрого прототипирования модулей изображающей электростатической оптики плазменных спектрометров: достигнуты заявленные аналитические характеристики, близкие к расчетным значениям, – азимутальное поле зрения 160°, угловое разрешение до 10°, энергетическое разрешение  $\Delta E/E = 6.5\%$ .

Проведенные работы по определению аналитических характеристик прибора позволили подтвердить корректность функционирования разработанной ранее компьютерной модели спектрометра.

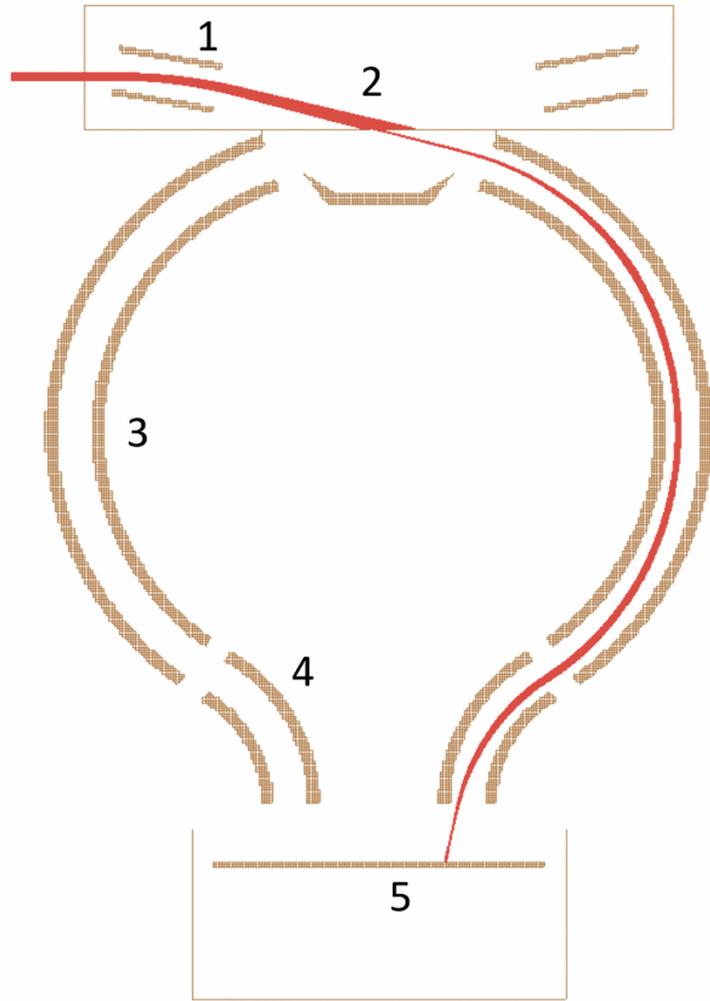
#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Моисеенко Д.А., Вайсберг О.Л., Петух А.И., Журавлев Р.Н.* // Космические исследования. 2024. Т. 62. № 6. С. 655. <https://doi.org/10.31857/S0023420624060098>
2. *Desai M.I., Ogasawara K., Ebert R.W., McComas D.J., Allegrini F., Weidner S.E., Alexander N., Livi S.A.* // Rev. Sci. Instrum. 2015. V. 86. № 5. P. 054501. <https://doi.org/10.1063/1.4921706>

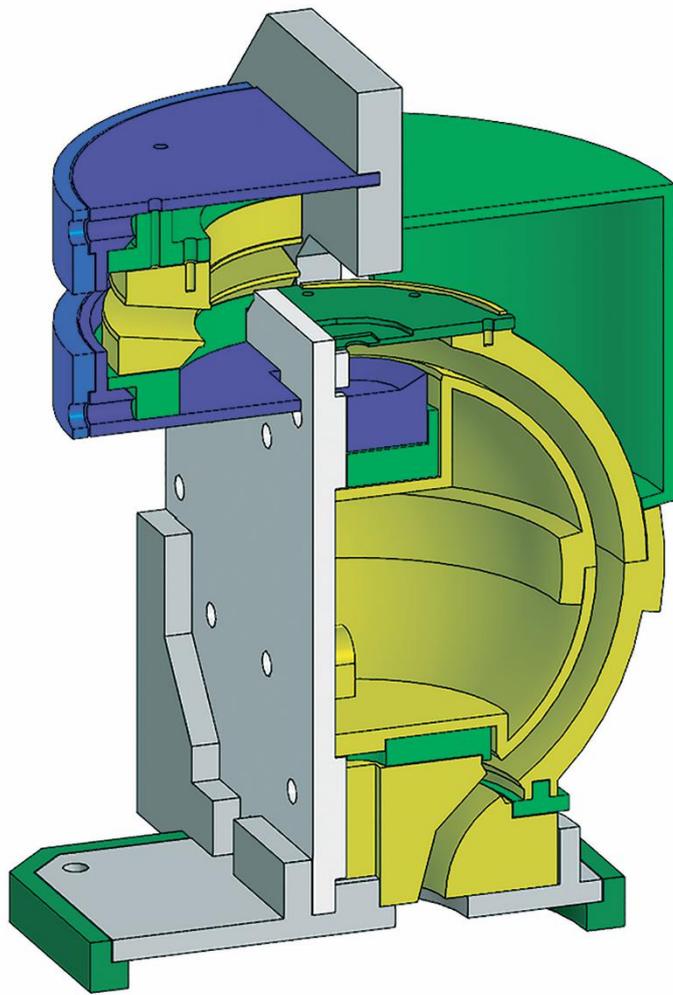
3. *Larrick Q., Pollock C., Hampton D., Avakov L., Gershman D., Thorsen D., Shipman G., Atencio J., Melkomukov A.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2024. V. 95. № 11. P. 114503. <https://doi.org/10.1063/5.0219571>
4. *Diaz A., Velasquez-Garcia L.F.* // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2024. V. 73. P. 1. <https://doi.org/10.1109/TIM.2024.3372214>
5. *Riedo A., Schmidt P.K., Boeren N.J., Gruchola S., Knecht L.N., Tulej M., Wurz P.* // *J. Anal. At. Spectrom.* 2025. V. 40. № 6. P. 1469. <https://doi.org/10.1039/D4JA00392F>
6. *Collinson G.A., Dorelli J.C., Avakov L.A. et al.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2012. V. 83. P. 033303. <https://doi.org/10.1063/1.3687021>
7. *Ai X.Y., Ren J., Zong Q.G., Hao Y.X., Feng Z.J., Xiang T.Y.* // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2025. V. 130. № 6. P. e2025JA033878 <https://doi.org/10.1029/2025JA033878>
8. *Lee C.N., Min K.W., Lee J.J. et al.* // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2010. V. 115. P. A09223. <https://doi.org/10.1029/2009JA015071>
9. *Моисеев Д.А., Вайсберг О.Л., Шестаков А.Ю. и др.* // *ПТЭ.* 2019. № 3. 83. P. 52. <https://doi.org/10.1134/S0032816219020265>

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Структура электростатической оптики спектрометра: 1 – сканирующее устройство, 2 – центральная диафрагма, 3 – тороидальный электростатический анализатор, 4 – корректирующий электрод, 5 – координатно-чувствительный детектор. Красной линией показаны траектории движения заряженных частиц.
- Рис. 2.** 3D-модель спектрометра ЭЛСПЕК с узким полем зрения.
- Рис. 3.** Прототип спектрометра электронов ЭЛСПЕК: **а** – сканирующее устройство, **б** – электростатический анализатор, **в** – собранный модуль оптики.
- Рис. 4.** Нормированная скорость счета детектора в зависимости от полярного и азимутального углов.
- Рис. 5.** Угловое распределение электронов по азимутальному углу прототипа ЭЛСПЕК для диафрагмы 1 мм.
- Рис. 6.** Энергетическое разрешение спектрометра.



**Рис. 1.**



**Рис. 2.**

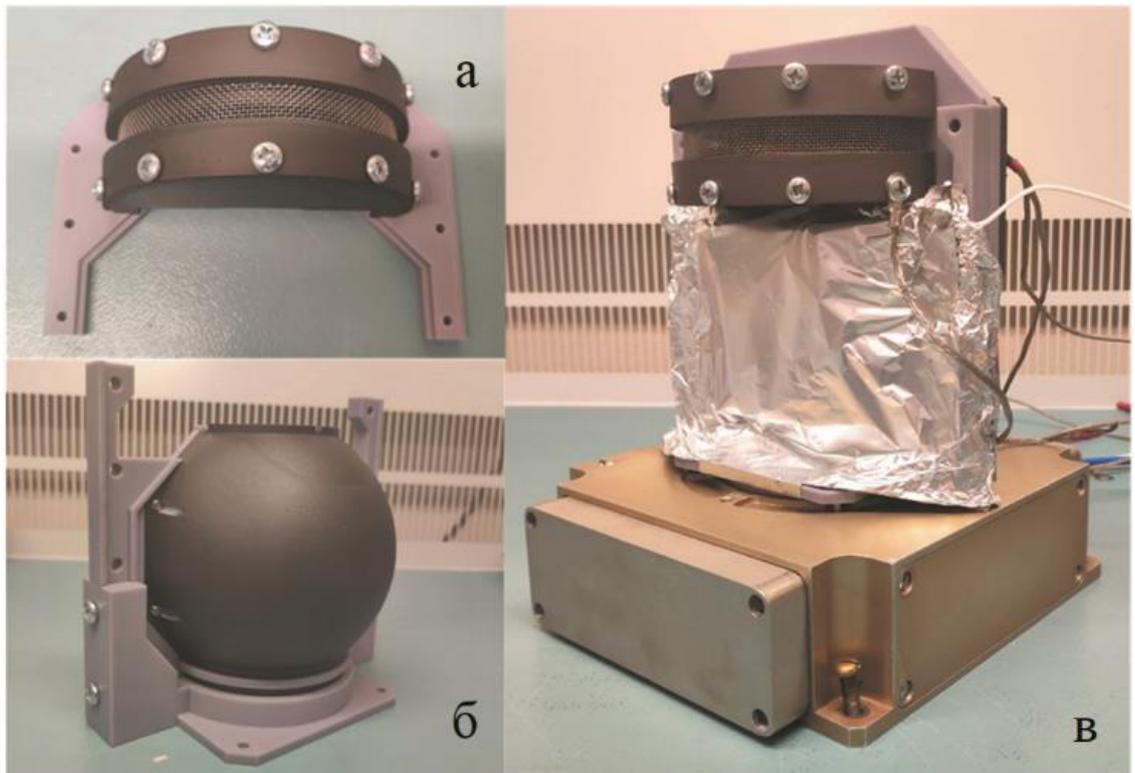
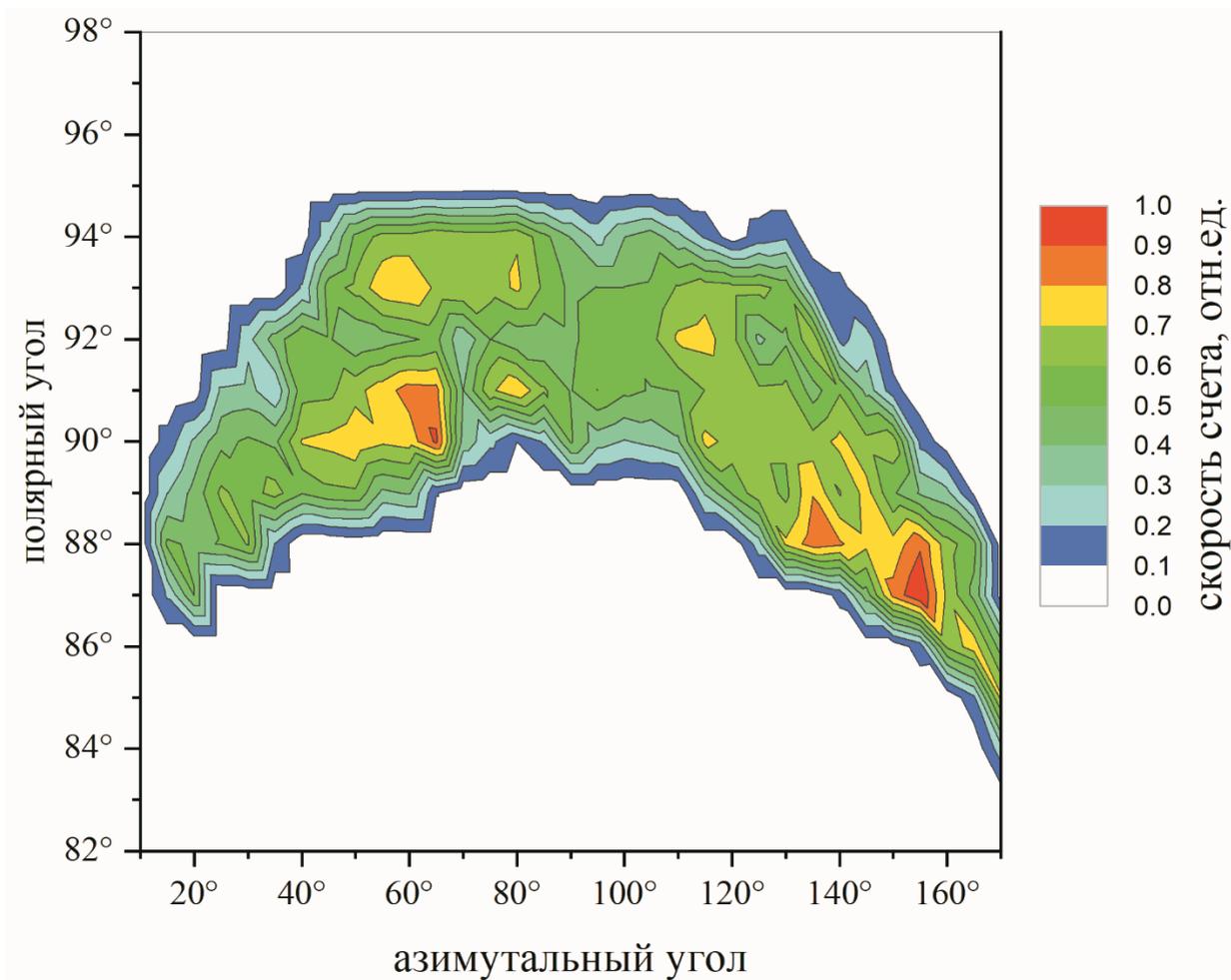


Рис. 3.



**Рис. 4.**

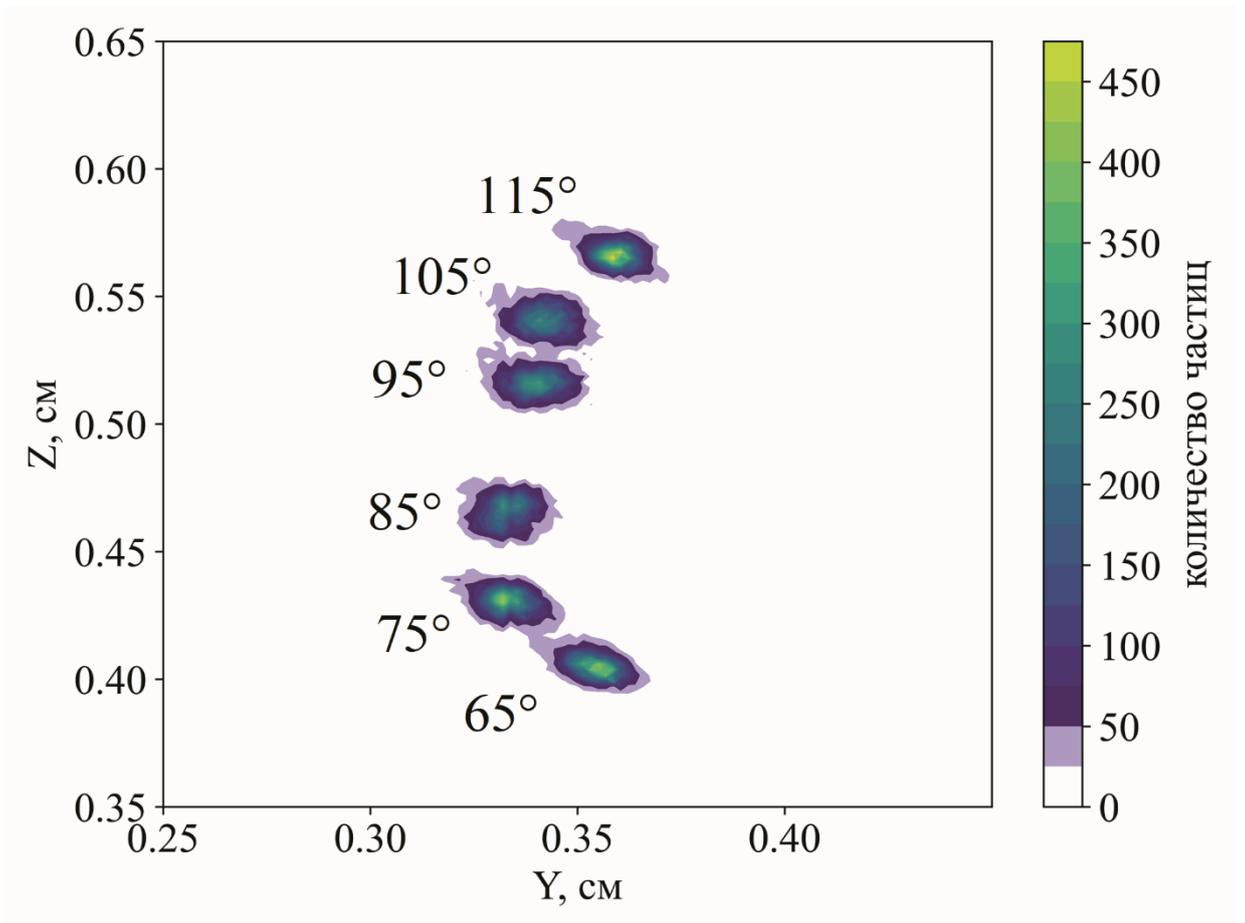


Рис. 5.

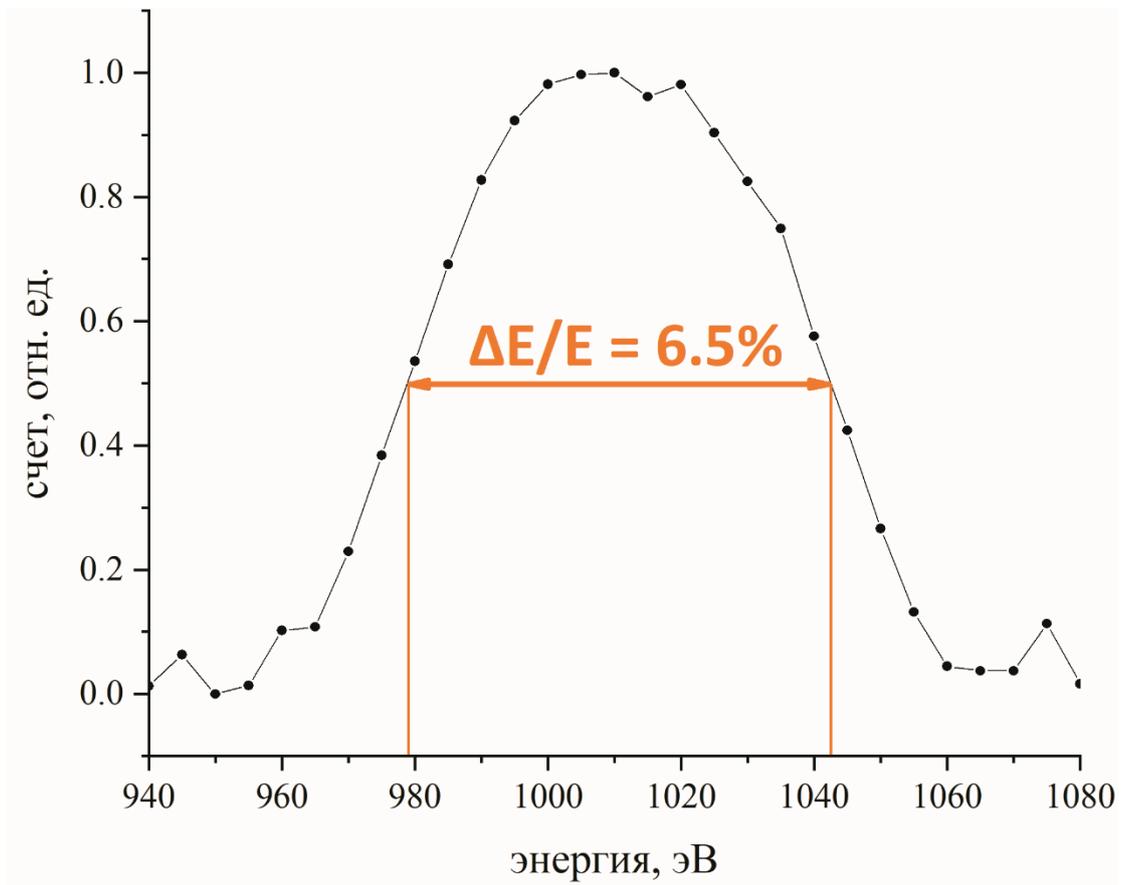


Рис. 6.